第 40 卷 第 2 期
2022 年 6 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40, No. 2
June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.03

利用红团簇星测定超新星遗迹距离

雷贤欢[1,2]，朱 辉[1]，单素素[1,2]，张海燕[1,3,4]，田文武[1,2]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100021； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 中国科学院 FAST 重点实验室，北京 100101； 4. 河北省射电天文技术重点实验室，石家庄 050081)

摘要： 超新星遗迹 (supernova remnants, SNRs) 是星际介质的重要来源，是理解超新星爆发机制、银河系宇宙线的加速和星际介质中化学元素丰度的重要载体。对 SNRs 距离的准确测量能对遗迹的其他物理参数进行更好的约束。在目前已经证认的 SNRs 和新发现的 SNRs 候选体中，有约 1/3 的 SNRs 及候选体有比较可靠的距离测量信息。通常测量 SNRs 距离的主要方法有 3 种：运动学方法、Σ-D 关系法、消光-距离法。近几年，基于消光-距离的测距原理，利用红团簇星作探针来测量 SNRs 距离的方法得到迅速发展并广泛应用。红团簇星是一类正处于 He 核燃烧阶段的小质量恒星，它们的绝对光度和本征颜色弥散小，很容易被识别出，故常被用来作为标准烛光进而测量天体的距离。介绍了目前 SNRs 测距的进展，总结了利用红团簇星测量 SNRs 距离的进展。

关 键 词： 超新星遗迹；消光-距离；红团簇星

中图分类号： P145.3 **文献标识码：** A

1 背 景

恒星演化晚期发生毁灭性爆炸，爆炸时恒星迅速抛出大量物质，这些物质在膨胀过程中与周围星际介质相互作用并形成丝状的气体云遗留在空间，从而形成超新星遗迹 (supernova remnants, SNRs)。SNRs 抛射物中含有恒星热核反应和爆炸过程中形成的重金属元素，是星系中重金属元素的重要来源。目前，银河系内超新星遗迹及候选体的数量为 300 ~ 400 颗[1−3]。SNRs 的辐射可以覆盖从射电到 γ 射线全波段，在 Ferrand 和 Safi-Harb[2] 及 Green[4] 的超新星遗迹列表中可以发现，约 93% 的 SNRs 有射电观测，约 42%有 X 射线观测，约 31% 有光学观测，另外有约 50 个 SNRs 与 γ 射线源成协[5]。

SNRs 与多种高度活跃的天体物理现象有关，如异常 X 射线脉冲星、软 γ 射线重复暴、

收稿日期： 2021-08-02； **修回日期：** 2021-11-04

资助项目： 科技部大科学装置重点研发项目 (2018YFA0404203, 2018YFA0404202)；国家自然科学基金 (12041301, U1831128, 12073039)；中国载人航天工程巡天空间望远镜专项 (CMS-CSST-2021-A09)

通讯作者： 田文武，tww@bao.ac.cn

脉冲星风云、非热 X 射线和甚高能 γ 射线等[6]。其形态构成由两个过程主导：(1) 激波与周围介质相互作用形成的壳层结构；(2) 脉冲星风驱动的星云。这两个过程空间上的独立演化分别为“壳层型”和“实心型”超新星遗迹，当脉冲星风云在超新星遗迹壳层里时，称为“混合型”。对于少数超新星遗迹，没有脉冲星且中心 X 射线辐射来源于热等离子体，称为“热混合型”。在 Green 超新星遗迹列表中有约 80% 是壳层型，约 13% 是混合型，约 3% 为实心型[4]。

超新星爆发时，如果认为爆炸在所有的方向上是均匀分布的，则超新星遗迹的形态是对称的，事实上超新星遗迹的形态是不规则的。影响超新星遗迹形态的因素可能有：(1) 星周介质。当星周介质被强劲的星风吹成复杂的空腔网络结构时，超新星遗迹展现出多壳层结构[7]，如 IC443。(2) 星际介质。观测上，越靠近银盘方向的超新星壳层越亮；模拟上，星际介质密度越大，壳层越亮。(3) 前身星。前身星的运动方向和恒星星风可以用来解释双弧形壳层结构的成因[8]。(4) 与 SNRs 成协的脉冲星。脉冲星在诞生之初，平均速度约为 100 $\mathrm{km \cdot s^{-1}}$，因此脉冲星风云通常不在壳层的几何中心[9]。

SNRs 的距离是研究其本身及其环境的重要参数。距离的测量是获取其他基本参数 (如年龄、大小、光度及演化阶段等) 所必需的。并且，准确的距离测量还可用于研究与之成协的天体距离，如脉冲星、脉冲星风云、HII 区以及分子云等。在部分已有距离测量的 SNRs 中，可靠性和准确性方面都还有待提升。一直以来，SNRs 的距离测量都是天文学家们研究 SNRs 的重点问题之一，因此 SNRs 距离测量的方法也在不断地被改进。本文对目前超新星遗迹距离的测量进展进行了汇总，第 2 章对常用测量 SNRs 距离的方法和取得的成果进行概述，第 3 章中介绍了利用红团簇星作探针测量 SNRs 距离的进展，第 4 章对目前 SNRs 测距的进展进行了总结。

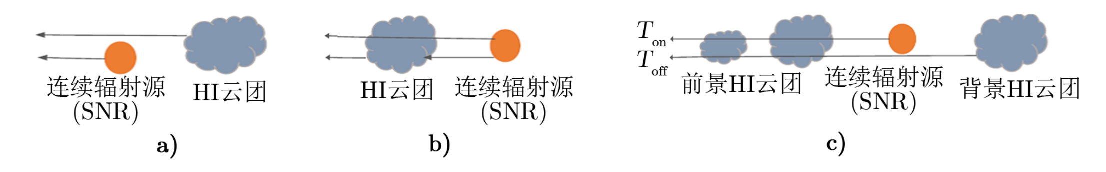
2 常用的超新星遗迹测距方法

目前常用于测量 SNRs 距离的主要方法有运动学方法、Σ-D 关系和消光-距离。这些测距依赖于 SNRs 周围的环境、与之成协的天体，以及遗迹所处的演化阶段等。银河系中广泛分布的中性氢 (HI) 为利用运动学方法测量天体距离提供了条件；通过对已有距离测量的壳层型 SNRs 进行统计，可根据拟合的 Σ-D 关系来估算 SNRs 的距离；消光-距离测距方法是利用尘埃云引起的消光跳变测量 SNRs 的距离，银河系中部分 SNRs 与分子云成协，使得利用消光-距离测距的方法得到发展应用。在 Green 超新星遗迹列表的 294 个超新星遗迹中，有约 1/3 的 SNRs 具有比较可靠的距离测量[4]。为提高遗迹距离测量的数量和准确度，测距的方法在不断地提升改进。下面是几种常用 SNRs 测距方法的介绍。

2.1 运动学方法

HI 广泛分布于星际介质中，并且冷 HI 云之间的平均距离小于 0.2 kpc。因此，当银道面上的 SNRs 附近有 HI 云团时，可计算前后 HI 云团的距离，进而限制 SNRs (视线方向) 的距离。如图 1 所示，a) 为当 HI 云团位于连续辐射源 (SNRs) 的后方，该方向产生 21 cm 发

射谱线；b) 为 HI 云团位于连续辐射源 (SNRs) 的前方时，该方向产生 21 cm 吸收谱线；c) 为根据实际情况，星际介质中充满了 HI 云团，超新星遗迹既有背景 HI 云团又有前景 HI 云团，根据测量计算 21 cm 谱线的吸收和发射计算 SNRs 前后分子云的距离，从而限制 SNRs 的距离。这种方法对射电亮的 SNRs 的距离测量比较可靠，较暗的 SNRs 的 HI 吸收谱线受背景的影响大。此外，射电亮的 SNRs 的吸收可以直接由单天线或者干涉观测到，使用这种方法测量距离更加直接[10]。



注：a) HI 云团位于连续辐射源 (SNR) 的后方；b) HI 云团位于连续辐射源 (SNR) 的前方，产生吸收；c) 真实的情况，连续辐射源 (SNR) 有前景 HI 云团和背景 HI 云团，产生 HI 吸收谱。

图 1 利用 HI 21 cm 谱线吸收和发射进行测距的原理图

运动学方法的原理是从辐射转移的基本方程中推导出 HI 吸收谱线。根据在局部热力学平衡下定义的原函数等于黑体函数 ($S_v = B_v(T) = 2k_{\rm B}T/\lambda^2$)，利用 $I_v = 2k_{\rm B}T_{\rm B}(v)/\lambda^2$ 将辐射转移转化为速度 v 处 HI 的亮温度 $T_{\rm B}$[6]：

$$T_{\rm B}(v) = \sum_{m=0}^{m_c} T^{\rm c}_{{\rm B},m}{\rm e}^{-\tau_m(v)} + \sum_{n=0}^{n_{\rm HI}} \tau^{(n)}(v)T_{{\rm B},n}(v){\rm e}^{\tau_n(v)} \quad . \tag{1}$$

其中，指数 m 是对发射区求和，指数 n 是对发射和吸收 HI 分子云求和。$\tau_m(v)$ 和 $\tau_n(v)$ 为每个连续体或 HI 区到观测者的总光深，$\tau^{(n)}(v)$ 是单个 HI 区沿视线方向的光深。从指向连续辐射源的光谱 $T_{\rm on}(v)$ 中减去指向背景的光谱 $T_{\rm off}(v)$，可得到 HI 21 cm 的吸收谱：

$${\rm e}^{-\tau_v} - 1 = \frac{T_{\rm B,on}(v) - T_{\rm B,off}(v)}{T^{\rm c}_{\rm B,on} - T^{\rm c}_{\rm B,off}} \quad , \tag{2}$$

其中，τ_v 为 HI 的光深，${\rm e}^{-\tau_v}$ 被绘制为 HI 吸收谱。这种方法被提出之后首先应用于超新星遗迹 Cassiopeia A (Cas A) 的距离测量[11, 12]。在获取 HI 吸收谱线的传统方法中，由于连续辐射源周围的 HI 云团分布不均匀性，没有跨过辐射源区 (SNRs) 和背景区视线方向的 HI 云团会产生假的 HI 吸收特征。

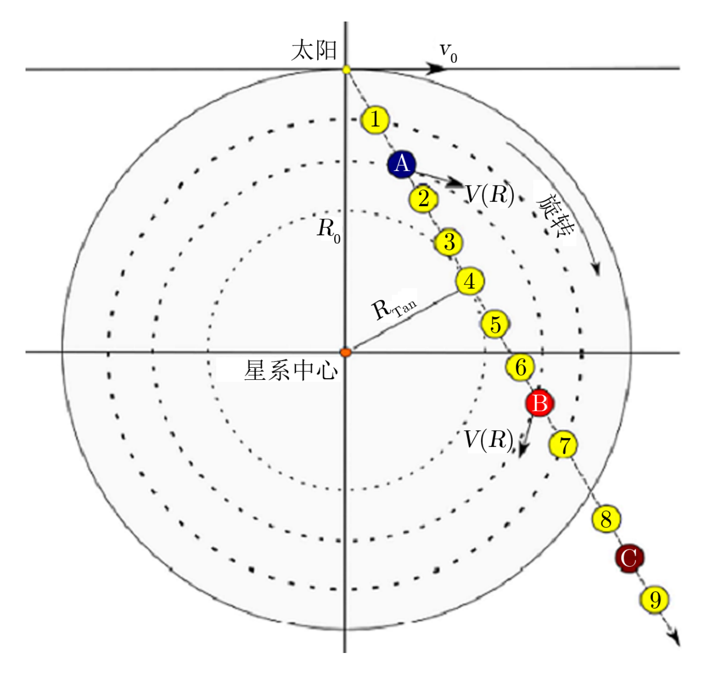
使用运动学方法测量 SNRs 的距离，需要依赖于理想的银河系旋转曲线模型。假设核球之外的银河系曲线都是扁平的，从观测中得到基于太阳系局部的视线速度，可以直接解析出云团到太阳系的距离。谱线的多普勒效应使云团产生了径向速度，理想的银河系旋转曲线能将径向速度与一个星系半径联系起来。对于任意给定的银经和视向速度，可得到唯一的绕银心的轨道半径[13]：

$$r = R_0 \sin(l)\frac{V(r)}{V_r + V_0\sin(l)} \quad , \tag{3}$$

其中，R_0 为太阳到银心的距离，V_0 为太阳绕银河系旋转的速度，$V(r)$ 表示银河系旋转曲线，V_r 则为云团的径向速度，l 为银经。如图 2 所示，在太阳轨道内部 $(r < R_0)$，一个径向速度在视线方向对应两个距离：

$$d = R_0\cos(l) \pm \sqrt{r^2 - R_0^2\sin^2(l)} \quad . \tag{4}$$

在切点处这两个距离 (近距离，$d = R_0\cos(l)$；远距离，$d = R_0\sin(l)$) 相等，云团在这个点上的轨道速度与视线平行。在太阳轨道外 $(r > R_0)$，一个径向速度只对应一个距离。

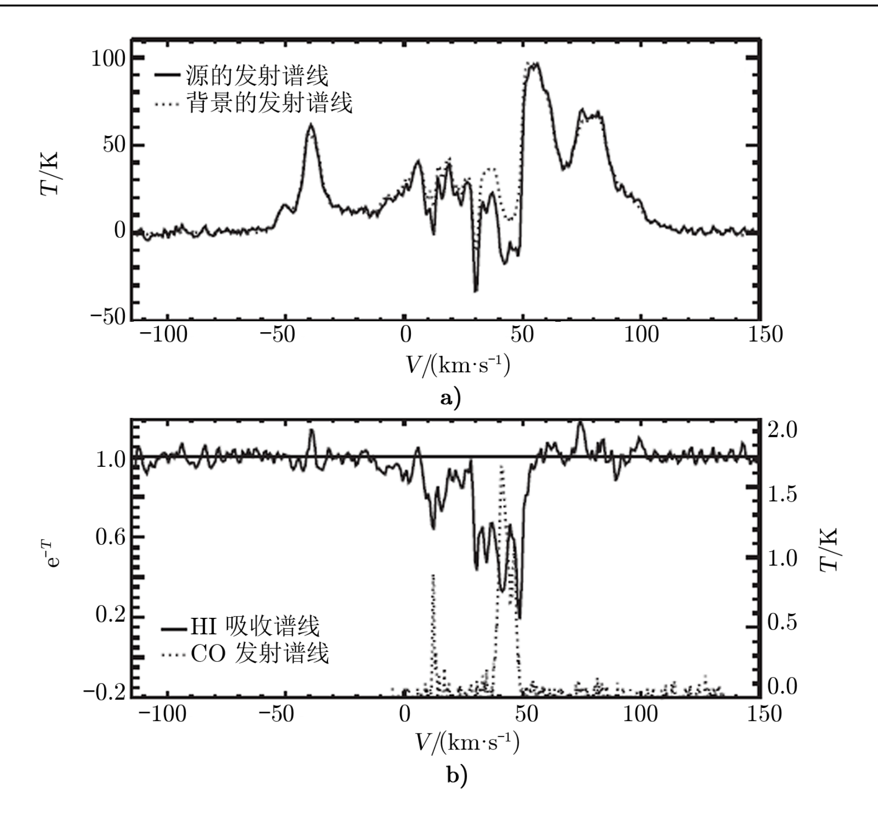


注：实线圈为太阳轨道。黄色点 1—9 表示 HI 分子云所在的位置；蓝点 A 和红点 B 表示在太阳轨道内，一个视线方向分别对应的近、远两个距离；褐色点 C 表示在太阳轨道外，一个视线方向对应一个距离。

图 2 使用 21 cm HI 连续吸收谱分析视线方向上不同距离的示意图[14]

近年来，得益于观测设备在分辨率和灵敏度方面的提高，Leahy 和 Tian[6] 与 Tian 等人[15] 对运动学方法做了改进，即结合 CO 发射线的观测进行分析。位于 SNRs 后方的 CO 云团不会在 SNRs 的吸收光谱中产生 HI 吸收特征，因此结合分析同一目标源方向上的 HI 吸收谱线和 CO 发射谱线，能更好地对距离进行限制。如图 3 所示的 SNR W44(G34.7-0.4) 谱线图，HI 吸收谱线显示的最大吸收速度约为 50 km·s^{-1}，根据银河系旋转曲线模型，该速度远远小于 SRN W44 视线方向的切点速度，并且在有 CO 谱线发射的地方都有对应的 HI 吸收谱线，这意味着 HI 云团位于 SNR W44 的前景，因此得出遗迹距离的下限为 3.3 kpc。由 SNR W44 的 HI 发射谱线显示，在大于 50 km·s^{-1} 的速度下，HI 发射谱线没有相关的吸收，因此该遗迹的距离约为 3.3 kpc[16]。

目前，在已有距离测量的 SNRs 中约有 90 个 SNRs 的距离利用运动学的方法进行测量和修正。多年以来 21 cm HI 谱线一直被用于超新星遗迹距离的测量[17, 18]，由于 HI 云团分



注：上半部分表示 HI 发射谱线，其中实线表示源的发射谱线，虚线表示背景的发射谱线；下半部分表示 HI 吸收谱线 (实线) 和 CO 发射谱线 (虚线)。

图 3　SNR W44 的 HI, CO 发射谱线与 HI 吸收谱线图[16]

布的不均匀性，单独分析 HI 谱线的吸收特征来限制 SNRs 的距离存在一定程度的不确定性。Tian 等人[15]与 Leahy 和 Tian[6]对这种方法进行了改进，即结合 HI 吸收谱线和 CO 发射谱线的特征对 SNRs 的距离进行限制，这个方法的改进提高了 SNRs 距离测量的准确性。许多学者已对 43 个 SNRs 的距离进行了测量和修正[6, 19–26]。Lee 等人[27]使用 UWISH2 对银河系内 SNRs 的 H_2 发射谱进行了系统的分析，并根据与 SNRs 有关的 H_2 发射特征测量修正了 16 个 SNRs 的距离。Frail 等人[28]通过对 20 个 SNRs 的 OH (1 720.5 MHz) 脉泽发线的探测，测量了 5 个 SNRs 的距离。根据与 SNRs 相关的 CO 发射谱线的速度也可直接估算 SNRs 的距离[29–31]，如 Chen 等人[32]根据一系列 SNRs 的 CO 发射线，计算了 6 个 SNRs 的距离。

运用运动学方法测量 SNRs 距离的典型误差约为 10% ∼ 25%[33]。这种方法的局限性主要表现在以下几方面：(1) 由于银河系旋转曲线模型的不确定性，当 HI 分子云位于速度场和旋转曲线偏差较大的区域时，可能会导致运动学距离的误差高达几个 kpc[34]；(2) 在太阳轨道圈内一个视线方向对应远、近两个距离，不好区分；(3) 构建一个可靠的 HI 吸收谱存在一定的困难，特别是对于由背景 HI 发射而导致变弱和扩散的 SNRs。

2.2 Σ-D 关系

表面亮度-直径关系 (radio-surface-brightness-to-diameter relation, Σ-D) 是一种用统计的方式来计算 SNRs 距离的方法。对于给定的射电频率 v，SNRs 的表面亮度与直径之间的关系可以写成[35]：

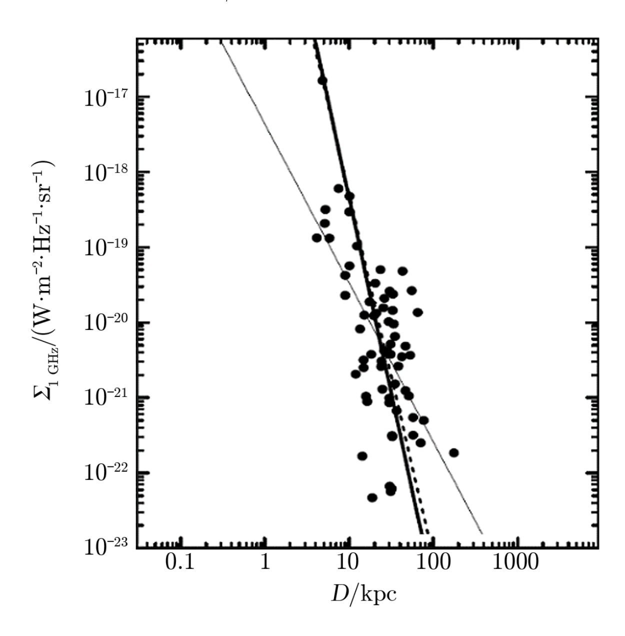
$$\Sigma_v(D) = AD^{-\beta} \quad , \tag{5}$$

其中，Σ_v 是 SNRs 的表面亮度；SNRs 的表面亮度不依赖于距离，可利用射电观测的数据来计算。D 为直径，A 和 β 是由观测或理论的模型确定的参数。

Σ-D 关系的校准依赖于一些已知距离的 SNRs 样本。在选择 SNRs 样本时，由于 SNR Cas A 的亮度太高，与其他 SNRs 有较大的差异，往往被排除[36]。在构建 Σ-D 关系的过程中，表面亮度 Σ 的频率通常为 1 GHz，因为流量密度测量，无论是在这个值之上还是之下，都是可用的。$\Sigma_{1\,\rm GHz}$ 不是一个测量值，而是利用观测到的 SNRs 的射电光谱得到的，遵循 $S_v \propto v^{-\alpha}$。如图 4 所示，Pavalovic 等人[37]利用 65 个具有距离测量的 SNRs 样本构建的 Σ-D 关系：

$$\Sigma_{1\,\rm GHz} = 6.9^{+4.6}_{-6.8} \times 10^{-14} \times D^{5.2\pm1.3} \quad , \tag{6}$$

其中，$\Sigma_{1\,\rm GHz}$ 的单位为 $\rm W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1} \cdot sr^{-1}$。这里使用了两种方式进行拟合：(1) 正交回归拟合，$\beta \approx 5.2$；(2) 最小二乘法拟合，$\beta \approx 2.1$。不同的拟合方法得到的 β 区别可达两倍。



注：粗实线代表正交回归拟合，$\beta \approx 5.2$；细实线代表最小二乘法，$\beta \approx 2.1$；点线代表其他样本的正交拟合回归线。

图 4　65 个 SNRs 样本在 1 GHz 处的 Σ-D 关系图[37]

在过去的几十年，基于 SNRs 距离测量数量增加和准确度的提升，Σ-D 关系被多次构建 (见表 1)。Cas 和 Bhattacharya[33] 利用 37 个已经具有距离测量的壳层型 SNRs 校准得

出新的 Σ-D 关系，用其估算单个 SNRs 距离误差约为 40%。Guseinov 等人[36] 利用 31 个具有可靠距离测量的壳层型和混合型的 SNRs 构建了 Σ-D 关系，并对所有观测到的 SNRs 进行了预测。Pavalovic 等人[35] 利用 60 个壳层型 SNRs 构建 Σ-D 关系，并用构建的关系估算了两个新发现的 SNRs 距离，误差约为 50%。之后，又用 65 个已知距离的壳层型 SNRs 对 Σ-D 关系进行更新，估算了 5 个较暗的 SNRs 的距离，不确定性为 35% ~ 40%[37]。Vukotic 等人[38] 使用 110 个 SNRs 样本构建 Σ-D 关系，并用其测量了 5 个新发现的 SNRs 和 27 个 SNRs 候选体的距离。

表 1 Σ-D 关系构建以及用新构建的 Σ-D 关系测量 SNRs 距离进展

样本数量	β	误差	新测量 SNRs 距离情况	参考文献
37	2.64	约 40%	—	[33]
31	5.99, 2.47	30% ~ 50%	对所有的 SNRs 距离进行了预测	[36]
60	48	约 50%	G25.1-2.3, G178.2-4.2	[35]
65	5.2	35% ~ 40%	5 个较暗的 SNRs 被测量	[68]
110	5	约 30%	5 个新发现的 SNRs，27 个 SNRs 候选体	[38]

使用 Σ-D 关系测量 SNRs 距离存在很大的不确定性，为了估计单个 SNRs 距离的 Σ-D 关系的准确度，定义了一个误差[33]：

$$f = \left| \frac{d_{\rm obs} - d_{\rm sd}}{d_{\rm obs}} \right| \quad , \tag{7}$$

其中，$d_{\rm obs}$ 是已测量的 SNRs 距离，$d_{\rm sd}$ 是由 Σ-D 关系估算的 SNRs 的距离。Σ-D 关系对个体 SNRs 距离测量的平均误差估计约为 40%，对集体 SNRs 的误差较低，20% ~ 30%。导致 Σ-D 估算 SNRs 距离存在较大误差的原因有：(1) 许多已经测量的 SNRs 距离具有一定程度的不确定性；(2) 校准样本的选择对参数 β 的影响达到 40% 以上，且不同最佳拟合算法得到的 β 差异可高达两倍；(3) 受观测效应的影响，如望远镜的灵敏度、分辨率、天空覆盖率等；(4) 适用的假设条件是所有壳层型 SNRs 的射电流量基本相同，这就要求超新星遗迹的爆炸机制是一样，爆炸能量是一致，周围演化环境相似；(5) 根据 SNRs 的磁流体模拟发现，在大质量前身星较强磁场条件下，射电流量依赖于观测角度 (观测方向和磁场的夹角)。

2.3 消光-距离测距

在银河系中，星际介质如尘埃、气体等会吸收和散射视线上的光，使得观测亮度暗于天体的实际亮度，这一现象称为消光。银道面大部分被尘埃遮挡。虽然尘埃只占星际介质质量的 1%，但却吸收了宇宙中约 30% 的星光并在红外重新辐射[39]。得益于大样本恒星的光度和光谱测量和获取了大量单个恒星的距离和消光的准确值，利用消光-距离方法将能够得到精确的 SNRs 距离[40, 41]。消光-距离测定 SNRs 距离的方法通常有两种：一种是通过消光-距离关系测定分子云的距离，再通过与 SNRs 成协的分子云来测定 SNRs 的距离 (称为方法一)；另一种是已知 SNRs 的消光，通过构建视线方向的消光-距离关系来估算 SNRs 的距离 (称为方法二)。这节内容主要对方法一的使用和成果进行介绍。

运用方法一测量遗迹的距离依赖于 SNRs 周围的环境。当 SNRs 有与之成协的分子云 (MCs) 时，可利用分子云的消光测定 SNRs 的距离。在目前已经证认的 SNRs 中，约有 70 个 SNRs 有与之成协的 MCs[32]。通过构建 SNRs 的三维尘埃空间分布图，可以为与 MCs 成协的 SNRs 提供距离信息。这种方法首先将选择的样本划分为特定大小的像素集，每个像素点的消光可由下面的函数进行参数化[42]：

$$A_r(\mu) = \sum_{0}^{\mu}(\Delta A_r^i) \quad , \tag{8}$$

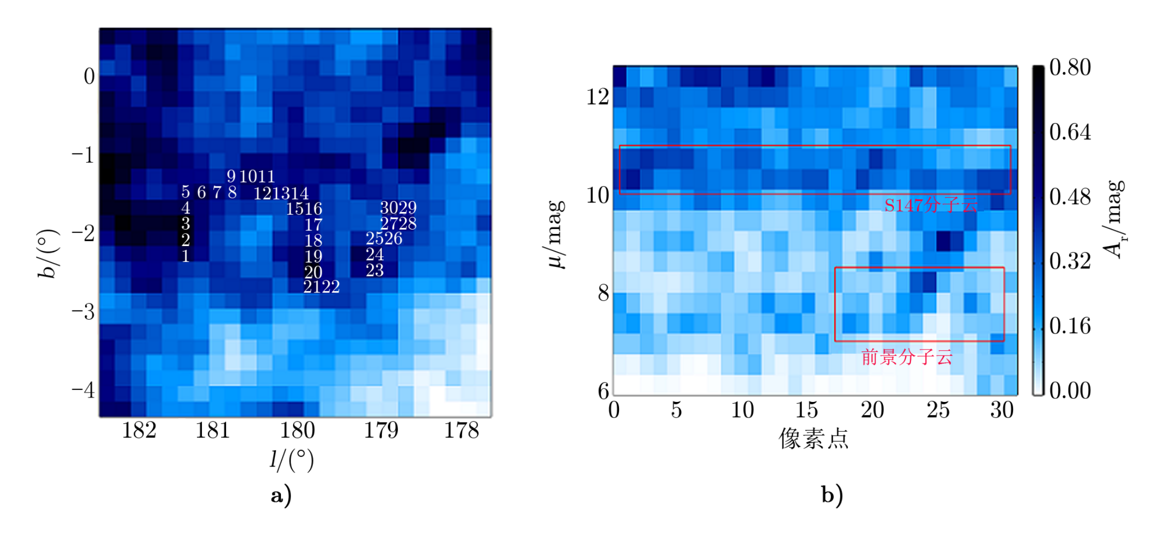
其中，μ 是距离模块，ΔA_r^i 表示第 i 个距离单元的消光。采用 MCMC 程序可得到 ΔA_r^i 的最佳值，由最大似然法定义的值：

$$L = \prod_{n=0}^{N} \frac{1}{2\pi\sigma_n} \exp\left[\frac{-(A_r^n - A_r^n(\mu))^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad , \tag{9}$$

其中，n 为像素点的索引，A_r^n 和 $A_r^n(\mu)$ 分别为研究工作中推导的消光和由式 (8) 模拟的消光，σ_n 是消光和距离的总误差。根据得到的 ΔA_r^i，画出不同尘埃消光的空间分布，之后拟合消光随距离变化的关系，最终根据消光急剧增加的位置测量 SNRs 的距离。

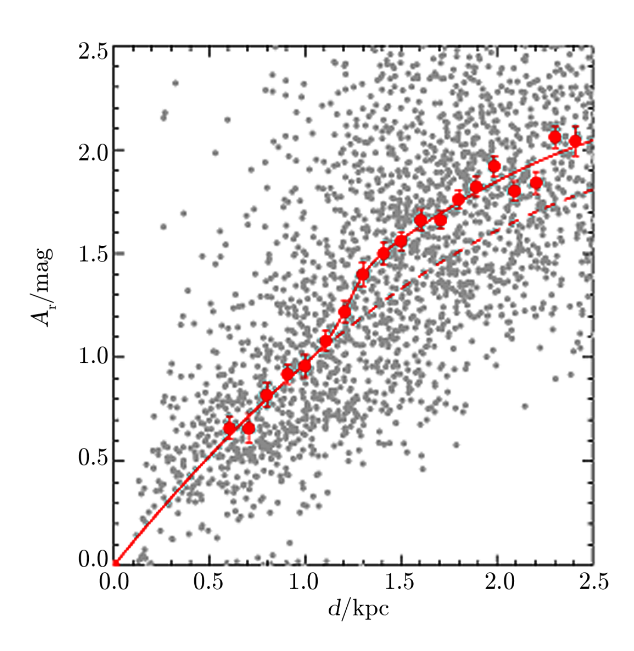
图 5 展示了分子云 S147 的消光距离的函数分布图，图 5 a) 中像素点 22 ~ 30 表示前景分子云的分布，1 ~ 22 中的消光是由分子云 S147 引起的。通过拟合像素 1 ~ 22 的消光随距离变化的曲线 (见图 6) 可知，消光增加的幅度约为 0.24 mag，分子云的宽度为 81 pc，消光峰值的距离约为 1.223 kpc。因此，根据拟合结果分析 S147 的距离为 1.22 kpc[42]。利用这种方法测量 SNRs 的距离，需要详细讨论消光示踪的分子云是否与 SNR 成协。结合 SNRs 视线中恒星的光度、光谱和天体测量信息，也可对 SNRs 的距离进行限制。利用视线方向的恒星作为消光的示踪体，使用色余比率 (即 $A_{\mathrm{K_S}}/E(J-K_S)$) 来构建遗迹的消光曲线。根据消光随距离变化的位置和幅度来估算 MCs 的距离，从而限制 SNRs 的距离。计算恒星的距离需要知道 $\mathrm{K_S}$ 波段的消光 $A_{\mathrm{K_S}}$，可由 $A_{\mathrm{K_S}} = c_e \times E(J-K_S)$ 得到，系数 c_e 源于近红外的消光规律：$A_\lambda = \lambda^{-\alpha}$[43]。

使用这种方法测量遗迹的距离不依赖于 SNRs 本身的消光值。如果分子云与 SNRs 成协，获得 SNRs 距离误差是测定消光-距离关系中跳变的消光峰值所在位置的误差，这取决于对单颗恒星的距离测量误差。Chen 等人[42] 测量 S147 的距离的过程中，使用的是恒星测光距离，S147 的距离误差大约为 17%。Zhao 等人[44, 45]利用恒星光谱代替测光，提高了单颗恒星的测距精度。他们以该方法为基础，构建了银河系中 33 个 SNRs 的消光曲线，并测量了 23 个 SNRs 的距离，其中有 16 个 SNRs 距离的可信度较高。Wang 等人[46]利用红团簇星示踪了银河系内 63 个 SNRs 的距离，其中有 34 个 SNRs 的距离准确度较高。由于红团簇星颜色和光度的稳定性，测量单个遗迹距离的准确度更高。Yu 等人[47]利用银河系外盘 ($150° < l < 210°$) 12 个 SNRs 和与之成协的分子云，构建了这 12 个 SNRs 的三维尘埃分布图，确定了可能与这些 SNRs 相互作用的分子云，并测量了 4 个 SNRs 的距离。他们使用 Gaia 三角视差得到恒星的距离，对于近处的 SNRs，单个恒星距离精度极高，其测定的某些 SNRs 距离误差精度可达约 5%。



注：a) 中像素点 1 ~ 22 表示分子云 S147 引起的消光，23 ~ 30 表示前景分子云引起的消光；b) 为这 30 个像素点在不同距离单元上的消光量，红色的方块大致分别表示属于前景云和 S147 分子云的像素边界。

图 5　分子云 S147 像素集的尘埃消光随距离变化的函数分布图[42]



注：红色圆圈表示单个距离格中 0.5 kpc 开始的中值，误差棒表示误差；红实线表示基于中值的最佳拟合消光定律；红虚线表示没有 S147 尘埃云的模型消光定律。

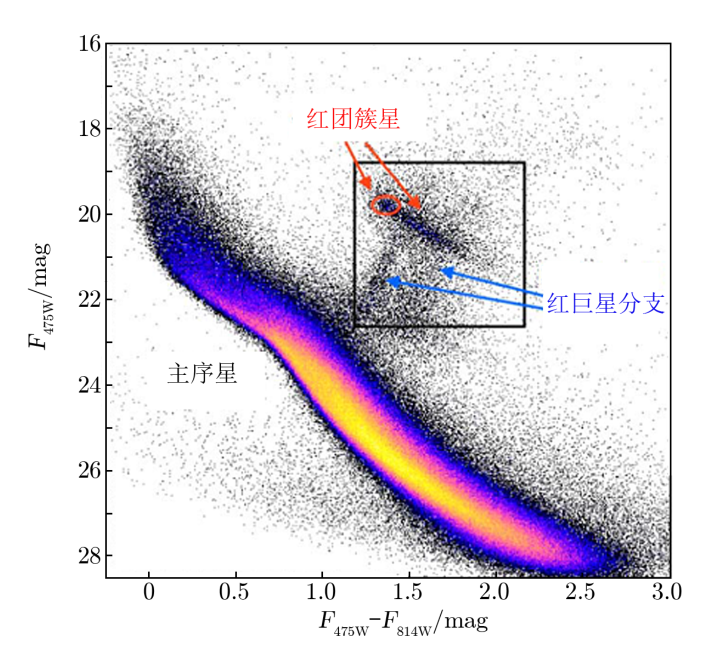
图 6　S147 的消光值与距离的关系图[42]

2.4 其他测距方法

对于一些特定条件下的超新星遗迹，还有以下几种测距方法：1) 测量超新星遗迹成协的点源距离，如 OB 型星和脉冲星。著名的帆船超新星遗迹 (vela SNR) 的距离实际上是用三角视差测得与之成协的 OB 型星的距离。脉冲星的距离可以利用脉冲弥散进行计算[48, 49]。2) 对于较近的超新星遗迹，可以通过观测激波面的自行和激波速度来估计距离，如开普勒超新星遗迹的距离是通过这种方法所测得[50]。3) 对于壳层型超新星遗迹，根据绝热膨胀的理论模型和 X 射线观测到的热气体温度，也可以给出距离估计[51]。

3 利用红团簇星测量超新星遗迹的距离

红团簇星 (red clumps, RCs) 是恒星演化过程中处于水平分支阶段的一类重要恒星。如图 7 所示，RCs 在颜色-星等图 (color-magnitude diagram, CMD) 中通常聚集在一个区域，很容易被辨认出来[52]。而且，紧凑的 RCs 比其他弥散的处于水平分支的恒星更年轻，且富金属。



注：横坐标为颜色，纵坐标为星等。红色圈所示为 RCs。

图 7 颜色-星等图[52]

RCs 常被人们当作“标准烛光”来对天体的距离进行测量，主要的原因有[53]：(1) RCs 处于比较稳定的 He 核燃烧阶段，其颜色和光度在很长的时间内保持不变；(2) He 核燃烧质量弥散小，因此其光度弥散小；3) 在银河系中比较丰富，其在恒星形成的星系中普遍存在，约占红巨星的 1/3。作为“标准烛光”，RCs 在天体的研究过程中被广泛应用：

López-Corredoira 等人[54] 利用 RCs 直接测量视线方向上的恒星密度分布；Durant 和 Van Kerkwuk[55]利用 RCs 测量具有异常 X 射线辐射的脉冲星距离；Güver 等人[56]使用类似的方法测量了小质量的 X 射线双星 4U 1608-52，很好地限制了这个中子星的物态方程。

在 2.3 节中已经介绍了使用消光-距离测距的原理，并且 Wang 等人基于消光-距离测距的方法一，利用 RCs 作为示踪体，测量了 63 个 SNRs 的距离。这种方法测量单个遗迹距离的精度较高。利用 RCs 测量 SNRs 的距离还可以基于消光-距离测距的方法二，通过测量遗迹处消光的大小和视线方向的消光-距离关系来计算距离。本章节将对 RCs 基于方法二测距的使用和进展进行介绍。

3.1 SNRs 消光的计算

消光主要是指星际间的尘埃和气体对电磁波的吸收和散射。消光值 $A_{\rm V}$ 的测量通常只依赖一个参数 $R_{\rm V}$，可通过测量发射线的比值来确定红化量，将红化转化为色余 $E(B-V)$，之后通过 $A_{\rm V}=R_{\rm V}\times E(B-V)$ 来计算消光 $A_{\rm V}$[57]。其中，对于银河系内弥散星际介质，总消光与部分消光的平均比值 $R_{\rm V}$ 通常为 3.1[58−60]。然而，个体真实的值与这个平均的值之间存在一定的误差。Schlafly 等人[61]用利用 APOGEE, PS1, 2MASS 和 WISE 的巡天数据测量了银盘上 37 000 颗恒星的红化量，并通过计算得到 $R_{\rm V}$ 的误差约为 18%。消光 $A_{\rm V}$ 的误差可用 $A_{\rm V}\times\sqrt{\left(\frac{\sigma(R_{\rm V})}{R_{\rm V}}\right)^2+\left(\frac{\sigma E(B-V)}{E(B-V)}\right)^2}$ 估算。

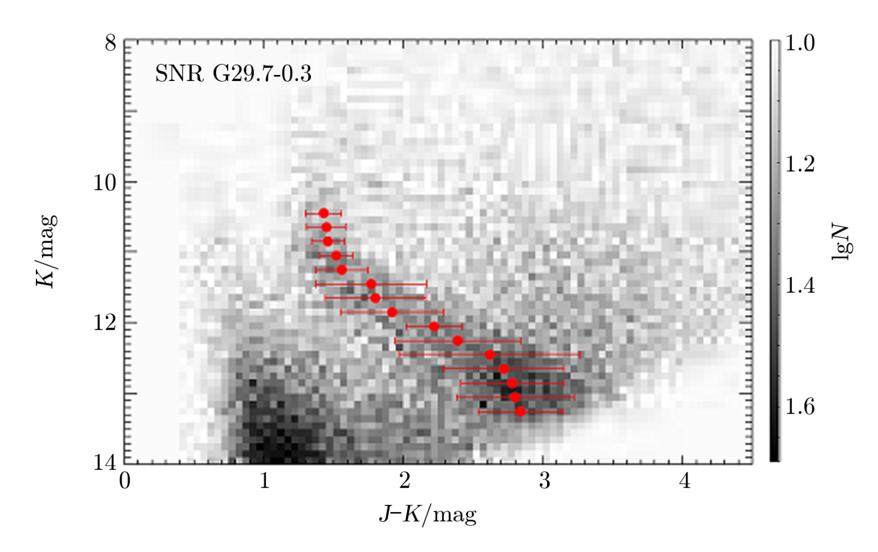
估算红化量通常使用巴尔线系中 Hα(6 563Å) 和 Hβ(4 861 Å) 的比值，因为这两个发射线足够强，容易被观测到。还有一些用到的发射线比有：[SII](10 320 Å)/[SII](4 068 Å), [FeII](1.643 5 μm)/[FeII](1.256 7 μm)[62]。这些发射线集系一般来自相同的高能级，只轻微依赖周围的物理条件，如温度和气体密度等。因此，它们适合用来估算延展源 (如超新星遗迹、电离 H 区和行星状星云等) 的消光。还有一种方法是将与 SNRs 成协的单个恒星的消光近似为 SNRs 的消光。

3.2 构建视线方向的消光-距离关系

在给定的星等范围内，通常能在 CMD 中找到 RCs 聚集的区域。Skrutskie 等人[63]从 2MASS 全天点源表中选取超新星遗迹 0.5 平方度内的恒星样本。之后，在选择的恒星样本内利用 J, $K_{\rm S}$ (简称 K) 波段的数据构建 CMD。为了阐述该方法，以 SNR G29.7-0.3 为例，如图 8 是 SNR G29.7-0.3 的 CMD，RCs 集中在红点所示的位置[64]。在 $A_{\rm V}-D$ 关系构建的过程中，根据 K 的大小将 CMD 横向切割成若干个条状子样本，每个子样本的宽度一般为 0.3 mag，在子样本较小的情况下，如果 RCs 的最大密度值小于 10，样本可拓展到 0.5 mag 或者 0.7 mag。子样本的长度取决于 RCs 的局部分布，以此来保证子样本中包含最多的 RCs 和最少其他类型的“污染”恒星。

如图 9 所示，对于每个条形子样本，可用一个包含拟合 RCs 的 $(J-K)_{\rm peak}$ 的高斯分布和“污染”恒星的幂律函数来拟合恒星的分布直方图：

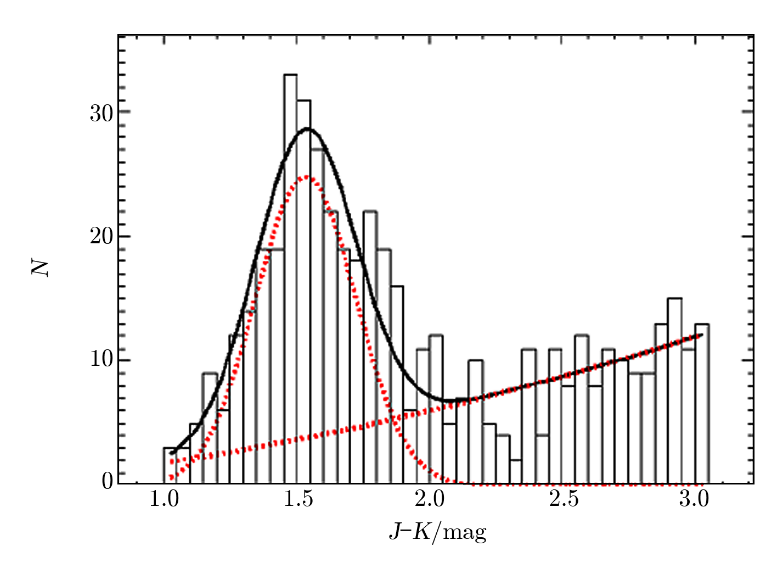
$$y=A_{\rm RCs}\exp\left\{\frac{-[(J-K)-(J-K)_{\rm peak}]^2}{2\sigma^2}\right\}+A_{\rm C}(J-K)^{\alpha}\quad, \tag{10}$$



注：灰度表示恒星密度，颜色越深，密度越大。红色点线表示红团簇星的峰值点和 1σ 误差。

图 8　在 SNR G29.7-0.3 方向的 0.5 平方度内，21 032 颗恒星的颜色-星等图[64]

其中，$J-K$ 为恒星颜色[55]。RCs 的本征颜色 $(J-K)_0$ 为 0.63 mag，Hawkins 等人[65] 使用 2MASS, Gaia 和 Wise的观测数据得到 RCs 在 K 波段的平均绝对星等约为 -1.61 mag。根据拟合的 $(J-K)_{\rm peak}$ 结果可知该区域的消光值 $A_{\rm V}$ 和对应的距离 D[66]。通过这种方法可以构建距离与消光一一对应的关系。因此，若已知 SNRs 的消光值，可根据视线方向的 $A_{\rm V}-D$ 关系来计算 SNRs 的距离。



注：黑色曲线表示该直方图的最佳高斯拟合，红色点线分别表示高斯和幂律成分的分布。

图 9　星等在 [11.1, 11.4] 区间的样本的恒星颜色 $J-K$ 的直方图[64]

3.3 利用红团簇星测量超新星遗迹距离的进展

随着 RCs 在 SNRs 测距中的应用与发展，一些 SNRs 的距离首次被测量，部分 SNRs 距离测量的准确性也得到提高。基于方法一的测距原理，Wang 等人[46] 以 RCs 作为示踪体，使用 2MASS, UKIDSS 和 VVV 近红外光度质量好于 0.05 mag 的观测数据，测量了银河系内 63 个 SNRs 的距离。其中，有 7 个测量准确度较高的 SNRs 距离是第一次被测量：G5.4-1.2, G308.8-0.1, G318.2+0.1, G318.9+0.4, G327.1-1.1, G329.7+0.4, G341.2+0.9。利用这种方法测量单个遗迹的距离精度也较高。

基于上述方法二的测距原理，Shan 等人[68] 构建了银道面上第一象限内 48 个已知消光的 SNRs 的视线方向上的 $A_{\rm V}-D$ 关系。其中，有 16 个 SNRs 的消光值在 RCs 示踪的消光范围内，并且根据构建的 $A_{\rm V}-D$ 关系测量了这 16 个 SNRs 的距离。其中，G65.8-0.5, G66.0-0.0, G67.6+0.9 这 3 个 SNRs 的距离是首次测量，剩余的 32 个 SNRs 的消光值不在 RCs 所示踪的消光范围内，只获得了这些遗迹距离的上限或下限[64, 67]。之后，Shan 等人[68] 利用同样的方法测量银河系第二、三、四象限的 SNRs 的距离，并测量了第四象限中 9 个 SNRs 的距离。然而，在第二、三象限尝试测量已知消光的 SNRs 的距离时，由于目标源方向的消光随着距离的增加增长缓慢，因此 $A_{\rm V}-D$ 曲线极其平缓，根据 SNRs 的消光值计算距离比较困难[68]。使用这种方法测量 SNRs 的距离，由 RCs 引起系统性的距离误差约为 10%[64]。由于这种方法不仅需要考虑消光-距离关系的精度，还要考虑 SNRs 自身消光的精度，对于个别自身消光精度不准确的 SNRs，误差可达 30% 左右[68]。

4　总结与展望

SNRs 可靠的距离测量不仅可以帮助我们理解遗迹本身的物理性质，还有助于理解超新星爆发在整个银河系的三维分布。表 2 对 SNRs 距离测量法的现状进行了总结。

表 2　SNRs 距离测量方法总结

方法	测量 SNRs 的数目/个	可靠性概述
运动学方法	约 90	此方法对射电亮的 SNRs 的距离测量比较可靠，较暗的 SNRs 的 HI 吸收谱线受背景影响大，测量的距离误差约 10% ~ 25%
Σ-D 关系	约 50	对个体 SNRs 距离测量的误差估计约为 40%，对集体 SNRs 的误差较低约 20% ~ 30%
消光-距离	约 30	方法一测量 SNRs 距离的精度取决于单个恒星距离的测量精度。对于近处距离测量精度高的恒星，SNRs 距离的测量精度很高，误差约为 5%
红团簇星	约 120	基于方法一利用 RCs 作示踪体测量单个 SNRs 距离的精度较高；基于方法二使用 RCs 测距，由 RCs 引起的系统误差约为 10%，个别遗迹距离的误差可达约 30%

第 2 章对运动学方法、Σ-D 关系和消光-距离测距的方法一测量 SNRs 距离的原理和进展进行了介绍。运动学方法测量 SNRs 的距离主要依赖于与 SNRs 相关联的 HI 分子云，在已测量距离的 SNRs 中约 60% 是由运动学方法测出的，基于观测的空间分辨率以及灵敏度方面的改进，约有 40 个 SNRs 的距离被测量修正，使用这种方法测量 SNRs 的典型误差为 10% ~ 25%。Σ-D 关系是估算 SNRs 距离最普遍的方法，使用这种方法估算单个 SNRs 的距离不确定性约为 40%，对集体 SNRs 距离估算的不确定性约为 20% ~ 30%。基于消光-距离测距方法一的原理，通过分析 SNRs 与 MCs 的成协关系来测量 SNRs 的距离，测量误差取决于单颗恒星距离测量的误差，对于近处距离精度高的恒星，某些 SNRs 距离测量的可信度很高，误差只有 5% 左右。第 3 章主要介绍了基于消光-距离测距方法二，利用 RCs 作标准烛光测量 SNRs 距离的方法。Shan 等人利用这种方法构建了部分 SNRs 视线方向上的消光-距离关系，系统地测量了银河系内 100 多个具有消光信息的 SNRs 的距离。使用这种方法示踪 SNRs 的距离，由 RCs 引起系统性的距离误差约为 10%；个别 SNRs 由于自身消光精度的不准确性，导致的误差约为 30%。

利用 RCs 测量 SNRs 的距离受限于 RCs 样本数量和纯净度。得益于望远镜技术的升级，上百万颗 RCs 正在或即将被精细测定，如 LAMOST, Gaia, Large Survey Telescope (LSST), Wide Field Infrared Survey Telescope (WFIRST)，以及一些新的星震巡天，接下来可以测量一大批 SNRs、X 射线双星等重要天体的可靠距离。后续主要相关工作研究方向为：一方面可继续研究已有样本的 SNR-TeV 成协源的物理性质和环境；另一方面，可利用中国高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 的巡天数据，将认证更多未知 TeV 源，限制银河系内宇宙线的起源。

参考文献：

[1] Green D A. IAUS, 2014, 296: 188
[2] Ferrand G, Safi-Harb S. AdSpR, 2012, 49: 1313
[3] Anderson L D, Wang Y, Bihr Y, et al. A&A, 2017, 605: A58
[4] Green D A. JApA, 2019, 40: 36
[5] Burrows A S. PNAS, 2015, 112: 1241
[6] Leahy D A, Tian W W. ASPC, 2010, 438: 365
[7] Manchester R N. PASAu, 1994, 11: 84
[8] Zhang M F, Tian W W, Wu D. ApJ, 2018, 867: 61
[9] Hobbs G, Lorimer D R, Lyne A G, et al. MNRAS, 2005, 360: 974
[10] Kothes R, Reigh W, Foster T, Byun D Y. ApJ, 2003, 588: 852
[11] Williams D R W, Davies R D. Nature, 1954, 173:1182
[12] Hagen J P, Lilley A E, McClain E F. ApJ, 1955, 122: 361
[13] Roman-Duval J, Jackson J M, Heyer M, et al. ApJ, 2009, 699: 1153
[14] Ranasinghe S, Leahy D A. ApJ, 2017, 843: 119
[15] Tian W W, Leahy D A, Wang Q D. A&A, 2007, 474: 541
[16] Su H Q, Tian W W, Zhu H, et al. IAUS, 2014, 296: 372
[17] Radhakrishnan V, Goss W M, Brooks J W. ApJS, 1972, 24: 49

[18] Caswell J L, Murray J D, Roger R S, et al. A&A, 1975, 45: 239
[19] Leahy D A, Tian W W. A&A, 2008, 480: 25
[20] Ranasinghe S, Leahy D A, Tian W W. OPhyJ, 2018, 4: 1
[21] Ranasinghe S, Leahy D A. AJ, 2018, 155: 204
[22] Ranasinghe S, Leahy D A. MNRAS, 2018, 477: 2243
[23] Tian W W, Zhu H, M F Zhang, et al. PASP, 2019, 131: 4301
[24] Tian W W, Leahy D A. A&A, 2006, 447: 205
[25] Tian W W, Leahy D A. MNRAS, 2012, 421: 2593
[26] Tian W W, Leahy D A. ApJ, 2014, 783: 2
[27] Lee Y H, Koo B C, Lee J J. AJ, 2020, 160: 263
[28] Frail D A, Goss W M, Reynoso E M, et al. AJ, 1996, 111: 1651
[29] Supan L, Castelletti G, Supanitsky A D, et al. A&A, 2018, 619: 108
[30] Heinz S, Burton M, Brandt W N, et al. ApJ, 2015, 806: 265
[31] Zhou P, Zhou X, Chen Y, et al. ApJ, 2020, 905: 99
[32] Chen Y, Jiang B, Zhou P, et al. IAUS, 2014, 296: 170
[33] Case G L, Bhattacharya D. ApJ, 1998, 504: 761
[34] Xu Y, Reid M J, Zheng X W, et al. Sci, 2006,311: 54
[35] Pavlovic M Z, Urosevic D, Vukotic B, et al. ApJS, 2013, 204: 4
[36] Guseinov O H, Ankay A, Sezer A, et al. A&A, 2003, 22: 273
[37] Pavlovic M Z, Dobardzic A, Vukotic B, et al. AJ, 2014, 189: 25
[38] Vukotic B, Ciprijanovic A, Vucetic M M, et al. AJ, 2019, 199: 23
[39] Draine B T. ARA&A, 2003, 41: 241
[40] Chen B Q, Liu X W, Yuan H B, et al. MARAS, 2014, 443: 1192
[41] Green G M, Schlafly E F, Finkbeiner D P, et al. ApJ, 2015, 810: 25
[42] Chen B Q, Liu X W, Ren J J, et al. MNRAS, 2017, 472: 3924
[43] Wang S, Jiang B W. ApJL, 2014, 788: 12
[44] Zhao H, Jiang B W, Gao S, et al. ApJ, 2018, 855:12
[45] Zhao H, Jiang B W, Li J, et al. ApJ, 2020, 891: 137
[46] Wang S, Zhang C Y, Jiang B W, et al. A&A, 2020, 639: 72
[47] Yu B, Chen B Q, Jiang B W, et al. MNRAS, 2019, 488: 3129
[48] Cha A N, Sembach K R, Danks A C. ApJ, 1999, 515: 25
[49] Cordes J M, Lazio T J. arXiv:astro-ph/0207156, 2002
[50] Vink J. ApJ, 2008, 689: 231
[51] Kassim N E, Hertz P, Van Dyk S D, et al. ApJ, 1994, 427: 95
[52] Merica-Jones P Y, Sandstron K M, Clifton J L, et al. ApJ, 2021, 907: 50
[53] Girardi L. A&A, 1998, 54: 95
[54] Lopez-Corredoira M, Cabrera-Lavers A, Garzon F, et al. A&A, 2002, 394: 883
[55] Durant M, Van Kerkwuk M H. ApJ, 2006, 650: 1070
[56] Guver T, Ozel F, Cabrera-Lavers A, et al. ApJ, 2010, 712: 964
[57] Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J. ApJ, 1989, 345:245
[58] Draine B T. ApJ, 2003, 598:1017
[59] Wang S, Jiang B W, Zhao H, et al. ApJ, 2017, 848:106
[60] Schlafly E F, Finkbeiner D P. ApJ, 2011, 737: 103
[61] Schlafly E F, Meisner A M, Stutz A M, et al. ApJ, 2016, 821:78
[62] Oliva E, Moorwood A F M, Danziger I J. A&A, 1989, 214: 307
[63] Skrutskie M F, Cutri R M, Weinberg M D, et al. AJ, 2006, 131: 1163
[64] Shan S S, Zhu H, Tian W W, et al. ApJS, 2018, 238: 35
[65] Hawkins K, Leistedt B, Bovy J, et al. MNRAS, 2017, 471: 722
[66] Indebetouw R, Mathis J S, Babler B L, et al. ApJ, 2005, 619: 931

[67] Zhu H, Tian W W, Wu D. MNRAS, 2015, 452: 3470
[68] Shan S S, Zhu H, Tian W W, et al. RAA, 2019, 19: 92

Measure Distances of Supernova Remnants Using Red Clump Stars

LEI Xian-huan[1,2], ZHU Hui[1], SHAN Su-su[1,2],
ZHANG Hai-yan[1,3,4], TIAN Wen-wu[1,2]

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Beijing 100101, China; 4. Hebei Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Supernova remnant is an important source of the interstellar medium, and important mediation to understand the mechanisms of supernova explosions, the acceleration of Galactic Cosmic-Rays, and the abundance of chemical elements in the interstellar medium. An accurate measurement of the distance to an SNR can better constrain other physical parameters of the SNR. However, reliable distance measurement of SNRs is very challenging. Up to now, in the confirmed SNRs and newly discovered SNR candidates, about one-third of them have reliable distance measurements. Generally, there are three main methods to measure SNRs' distance: kinematic method, radio-surface-brightness-to-diameter relation and extinction-distance map. In recent years, based on the principle of extinction-distance relation, the method of measuring SNR's distances using red clump (RC) as probe has been well developed and applied. RCs are a kind of low-mass stars in the burning stage of the helium nuclei. Their absolute luminosity and dispersion are small, so they can be easily identified. Therefore, they are often used as standard candles to measure the distance of other celestial bodies. This paper will first introduce the current progress in SNR distance measurement, then will summarize the achievement using the RCs method.

Key words: supernova remnants; extinction-distance; red clumps